


Method and apparatus for preventing surge in a dynamic compressor.Patent Number:  EP0366219, A3, B1Publication
date: 1990-05-02

Inventor(s): MIRSKY SAUL; REINKE PAUL A; STAROSELSKY NAUM

Applicant(s): COMPRESSOR CONTROLS CORP (US)

Requested
Patent: DE68916555TApplication
Number: EP19890302550 19890315Priority Number
(s): US19880263172 19881026IPC
Classification: F04D27/02EC
Classification: F04D27/02LEquivalents: CA1291737, DE68910467D, DE68910467T, DE68916554D, DE68916554T,
DE68916555D, ES2045411T, ES2056686T, ES2056687T, NO174358B, NO174358C,
NO891239,  US4949276, ZA8907281Cited patent(s): US4142838; US3979655; DE1428066

Abstract

A method is disclosed for efficiently protecting dynamic compressors from surge under changing inlet conditions and in response to flow disturbances of varying size and speed. An antisurge control system based on this disclosed method will compute the relative proximity of the compressor operating point to its surge limit as a multi-variable parameter which is self-compensated for changes in gas composition, inlet temperature and pressure, compressor efficiency, guide-vane position, and rotational speed. A combination of adaptive closed- and open-loop control responses is used to maintain a margin of safety between the operating point and the surge limit. Both the safety margin and the magnitude of the open-loop response are proportional to the rate at which the operating point approaches the surge limit, thus maximizing process efficiency.

Data supplied from the esp@cenet database - I2



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der
europäischen Patentschrift

⑤1 Int. Cl.⁵:
F04D 27/02

⑧7 EP 0 500 196 B1

⑩ DE 689 16 555 T 2

②1	Deutsches Aktenzeichen:	689 16 555.2
⑧6	Europäisches Aktenzeichen:	92 201 363.6
⑧6	Europäischer Anmeldetag:	15. 3. 89
⑧7	Erstveröffentlichung durch das EPA:	26. 8. 92
⑧7	Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	29. 6. 94
④7	Veröffentlichungstag im Patentblatt:	20. 10. 94

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1
26.10.88 US 263172

⑦3 Patentinhaber:
Compressor Controls Corp., Des Moines, Ia., US

⑦4 Vertreter:
Fuchs, J., Dipl.-Ing. Dr.-Ing. B.Com.; Luderschmidt,
W., Dipl.-Chem. Dr.phil.nat.; Mehler, K., Dipl.-Phys.
Dr.rer.nat.; Weiß, C., Dipl.-Ing.Univ., Pat.-Anwälte,
65189 Wiesbaden

⑧4 Benannte Vertragsstaaten:
BE, CH, DE, ES, FR, GB, IT, LI, NL

⑦2 Erfinder:
Staroselsky, Naum, West Des Moines, Iowa 50265,
US; Reinke, Paul A., Elkart Iowa 50073, US; Mirsky,
Saul, West Des Moines, Iowa 50265, US

⑤4 Modus und Gerät zur Vermeidung des Pumpens in einem dynamischen Verdichter.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 689 16 555 T 2

DE 689 16 555 T 2

92 201 363.6

1

Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Verfahren und eine Vorrichtung, zum Schutz dynamischer Verdichter gegen Pumpen und insbesondere auf ein Regelsystem und ein Verfahren, welches sowohl geregelte als auch gesteuerte Reaktionen kombiniert, wobei beide Größen beider Reaktionen mit der Geschwindigkeit variieren, mit der der Arbeitspunkt des Verdichters sich der Pumpengrenzlinie nähert, wodurch die gesamte Regelreaktion an einen weiten Bereich von Störungen angepaßt wird.

Hintergrundtechnik

Wie bekannt ist, können sich verändernde Prozeßbedingungen den Volumenstrom durch einen dynamischen Verdichter unter den für einen stabilen Betrieb benötigten minimalen Wert verringern, was Pumpen zur Folge hat. Um dieses schädliche Phänomen zu vermeiden, muß das Regelsystem des Verdichters den Durchsatz durch den Verdichter auf einem hinreichend hohen Niveau aufrechterhalten, um seinen Regelalgorithmen zu ermöglichen, auf jede Störung zu reagieren, bevor der Durchsatz unter die Pumpgrenze fallen kann. Dies wird durch Rückführen oder Abblasen eines Teils des Gasstromes erzielt, jedesmal dann, wenn der Durchsatz an oder unter diesen gewünschten Sicherheitsabstand fällt.

Ein zu niedrig eingestellter Sicherheitsabstand führt zu einem unzureichenden Schutz gegen Pumpen. Auf der anderen Seite erhöht eine Vergrößerung des

Sicherheitsabstandes die Häufigkeit und Dauer der Rückführung und reduziert so den energetischen Gesamtwirkungsgrad des Verdichterprozesses. Ein beträchtlicher Vorteil kann durch eine Verbesserung des Regelalgorithmus erzielt werden, um einen Pumpschutz mit einem kleineren Sicherheitsabstand zu schaffen.

Die Bedingungen, unter denen Pumpen auftritt, werden beträchtlich durch Veränderungen des Molekulargewichtes des Gases, des spezifischen Wärmequotienten und des Verdichterwirkungsgrades beeinflusst. Früher verfügbare Pumpschutz-Regelverfahren können diese Veränderungen nicht berücksichtigen, so daß sie einen größeren Sicherheitsabstand benötigen, um vollen Schutz unter allen möglichen Betriebsbedingungen zu erzielen.

Die vorliegende Erfindung überwindet diese Beschränkung durch Berechnung des Abstandes zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze als eine eindeutige Funktion der Eingangs- und Auslaßtemperaturen und -drücke, der volumetrischen Eingangsgröße und (bei Verdichtern mit variabler Geschwindigkeit und/oder variablen Leitschaufeln) der Drehgeschwindigkeit und der Leitschaufelstellung. Der resultierende Parameter ist unveränderlich gegenüber allen Verdichterbetriebsbedingungen, einschließlich solcher (wie z.B. Molekulargewicht, spezifischer Wärmequotient und polytroper Wirkungsgrad), welche schwierig oder unmöglich direkt zu messen sind.

Früher verfügbaren Pumpschutz-Regelverfahren mangelt es auch entweder an der Möglichkeit, ihre Regelreaktion auf Störungen wechselnder Größe und Geschwindigkeit abzustellen, oder sie tun es in einer Weise, welche eine unnötige Rückführung bewirken kann und den Verdichter anfällig für Pumpen macht.

Stabilitätsbetrachtungen schließen eine Proportional-Integral-Regelreaktion zur Vermeidung von Pumpen aufgrund schneller Störungen aus, es sei denn der

Sicherheitsabstand ist größer, als er für langsame Störung benötigt wird, was wiederum den Wirkungsgrad senkt. Der bekannte Proportional-Integral-Differential-Regelalgorithmus bringt eine schnellere Antwort hervor, ist aber für eine Pumpschutz-Regelung ungeeignet, da sein Differential-Regelglied das Pumpschutz-Ventil öffnet, wenn der Verdichter weit von seiner Pumpgrenze betrieben wird.

Früher verfügbare Pumpschutz-Regler haben versucht, diese Beschränkung zu überwinden, indem sie die Verstärkung des Proportional-Integral-Algorithmus zu einer Funktion der Größe des Fehlers, der Ableitung des Fehlers, oder von beiden machten. Stabilitätsbetrachtungen hindern jedoch solche Methoden an der Vermeidung von Pumpen, wenn nicht ein größerer Sicherheitsabstand vorgesehen ist oder das variable Verstärkungsmerkmal nur in einer Richtung wirkt.

Systeme, welche die letztgenannte Lösung anwenden, tun dies durch Verwenden von Ventilstellungsgebern, welche das Ventil schnell öffnen, aber sehr viel langsamer schließen. Dieses Verfahren macht jedoch den Verdichter anfällig für Pumpen, wenn andere Störungen auftreten, während das Ventil geschlossen wird. Unter derartigen Bedingungen stimmt die Ventilposition nicht mit der Ausgangsgröße des Reglers überein -- es wird in Wirklichkeit weiter offen stehen. Da die Reaktion des Reglers auf die neue Störung auf falschen Voraussetzungen bezüglich der Ventilposition basieren wird, wird sich leicht seine Unzulänglichkeit, Pumpen zu verhindern, erweisen.

Aus diesem Grund verwendet die vorliegende Erfindung modifizierte Regelalgorithmen (anstelle von äußeren Hardware-Modifikationen), um dasselbe Ziel zu erreichen, ohne Pumpen im Falle von aufeinanderfolgenden Störungen zu riskieren.

Ein anderer Weg zur Überwindung der Stabilitätsbeschränkungen von geschlossenen Regelkreisalgorithmen besteht darin, eine Reaktion eines offenen Regelkreises zu verwenden, um einen zusätzlichen Stufenwechsel beim Öffnen des Pumpschutzventils durchzuführen, wenn die Störung sich als zu groß zum Handhaben durch die Reaktion des geschlossenen Regelkreises erweist. Diese Lösung ist jedoch denselben Stabilitätsbetrachtungen unterworfen wie ein geschlossener Regelkreisalgorithmus mit variabler Verstärkung. Außerdem wird eine Reaktion eines offenen Regelkreises, die groß genug ist, um gegen schnelle Störungen zu schützen, unnötigerweise den Prozeß als Reaktion auf kleine Störungen verzerren. Wenn man die Größe der Reaktion des offenen Regelkreises zu einer Funktion der Geschwindigkeit macht, mit dem sich der Verdichter dem Pumpen annähert, und dann diese Gesamtreaktion langsam gegen Null abklingen läßt, wenn er sich vom Pumpen entfernt, wird man beide Beschränkungen überwinden.

Ein früheres, für Staroselsky erteiltes Patent (US-Patent Nr. 4,142,838) umfaßte ein Verfahren zur Vermeidung des Pumpens, das auf einer Regelung des Verhältnisses des Druckanstieges über dem Verdichter zu dem Druckabfall über einer Durchflußmeßvorrichtung basierte. Dieses Verfahren vermied Pumpen durch die Verwendung einer Proportional-Integral-Reaktion eines geschlossenen Regelkreises in Verbindung mit einer Reaktion eines offenen Regelkreises mit einer festen Größe. Ein weiterer Schutz wurde geschaffen durch schrittweise Änderung der Sollwerte von sowohl der Reaktion des geschlossenen als auch des offenen Regelkreises, jedesmal dann, wenn ein Pumpen auftrat.

Die Wirkungsweise der in diesem früheren Patent vorgestellten Pumpschutzregelvorrichtung war nicht selbstanpassend an Veränderungen in der Gaszusammensetzung und dem Verdichterwirkungsgrad, noch war ihre Regelreaktion von dem Wert abhängig, mit dem sich der

Verdichterarbeitspunkt seiner Pumpgrenze näherte. Die vorliegende Erfindung verbessert dieses frühere Verfahren durch:

Berechnung des Abstandes zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze als ein multivariabler Parameter, der für breite Änderungen der Gaszusammensetzung und des Verdichterwirkungsgrades selbst kompensiert ist;

Berechnung des Regel-Sollwertes als eine Funktion der Geschwindigkeit, mit der der Arbeitspunkt sich der Pumpgrenze annähert, und sodann gestatten diesem Sollwert auf einen stationären Wert abzufallen, wenn sich der Arbeitspunkt von der Pumpgrenze hinwegbewegt; und

Berechnung der Größen der gesteuerten Reaktionen als eine Funktion der Geschwindigkeit, mit der sich der Arbeitspunkt der Pumpgrenze annähert und sodann gestatten dieser gesteuerten Reaktion auf Null abzufallen, wenn sich der Arbeitspunkt von der Pumpgrenze wegbewegt.

Offenbarung der Erfindung

Die vorliegende Erfindung ist in den beigefügten Ansprüchen definiert, und ihr Hauptzweck ist es, ein verbessertes Verfahren bereitzustellen, um dynamische Verdichter gegen Pumpen zu schützen, ohne unnötigerweise den Gesamtwirkungsgrad zu beeinträchtigen oder den das verdichtete Gas verwendenden Prozeß zu unterbrechen. Die Hauptvorteile dieser Erfindung sind, daß sie den Gesamtwirkungsgrad, die Verdichter- und Prozeßzuverlässigkeit und die Wirksamkeit des Pumpschutzes maximiert. Diese Vorteile erweitern den Arbeitsbereich des dynamischen Verdichters.

Eine Aufgabe dieser Erfindung ist es, die relative Nähe des Verdichterarbeitspunktes zu seiner Pumpgrenze in einer Weise zu justieren, die unveränderlich gegenüber Veränderungen in der Gaszusammensetzung, dem

Eingangsdruck und der Eingangstemperatur, dem Verdichterwirkungsgrad, der Leitschaufelstellung und der Drehgeschwindigkeit ist.

Zu diesem Zweck kann diese Erfindung den Abstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze als einen multivariablen, als eine Funktion des Ausgangs- und Eingangsdruckes des Verdichters, der Ausgangs- und Eingangstemperatur, dem Druckgefälle über einer Durchflußmeßvorrichtung, der Drehgeschwindigkeit des Verdichters und der Stellung seiner Leitschaufeln berechneten Kennwert messen. Wenn sich der Arbeitspunkt des Verdichters der Pumpgrenze nähert, nähert sich dieser Kennwert gleichbleibend einem einzigen Wert, welcher derselbe für alle Eingangs- und Betriebsbedingungen ist.

Um den Verdichter gegen Pumpen zu schützen, beeinflußt diese Erfindung den Verdichterdurchsatz, um einen angemessenen Sicherheitsabstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze aufrechtzuerhalten, welcher als eine Funktion des oben erläuterten multivariablen Kennwertes berechnet wird.

Wie bekannt, erhöht das Öffnen des Pumpschutzventils den Verdichterdurchsatz durch Rückführen oder Abblasen eines zusätzlichen Stromes des Prozeßgases. Die zur Verdichtung dieses Gases verwendete Energie ist vergeudet, und beeinträchtigt so den Prozeßwirkungsgrad.

Eine zweite Aufgabe dieser Erfindung ist es, diesen inhärenten Kompromiß zwischen Pumpschutz und Prozeßwirkungsgrad zu optimieren.

In Bezug auf diese zweite Aufgabe kann diese Erfindung die Größe des Sicherheitsabstandes an die Geschwindigkeit anpassen, mit der sich der Arbeitspunkt der Pumpgrenze nähert, wie durch den Betrag der Veränderung des oben beschriebenen multivariablen Kennwertes definiert. Wenn sich der Arbeitspunkt in Richtung auf Pumpen bewegt, spiegelt der Sicherheitsabstand

den größten Wert wieder, den die Ableitung erzielt hat. Wenn sich der Arbeitspunkt vom Pumpen wegbewegt, wird der Sicherheitsabstand langsam auf einen vorläufigen Minimalwert herabgesetzt.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist der, daß das Pumpschutzventil nicht früher oder weiter öffnet als es notwendig ist, um irgendeine gegebene Störung daran zu hindern, Pumpen hervorzurufen, so daß der Prozeßwirkungsgrad unter allen Bedingungen maximiert wird.

Um den Kompromiß zwischen Pumpschutz und Prozeßwirkungsgrad weiter zu verbessern, kann diese Erfindung die Größe des Öffnens des Pumpschutzventils als eine Verknüpfung der Reaktionen des geschlossenen und des offenen Regelkreises berechnen. Bei kleinen Störungen, bei denen der Abstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze nur leicht unter den gewünschten Sicherheitsabstand abfällt, wird nur die Reaktion des geschlossenen Regelkreises verwendet.

Bei großen Störungen, bei denen der Abstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze weit unter den gewünschten Sicherheitsabstand abfällt, wird die Reaktion des offenen Regelkreises verwendet, um den Durchsatz schnell anzuheben. Wenn dieser Abstand unter eine vorgegebene Gefahrenschwelle sinkt, leitet die Reaktion des offenen Regelkreises einen Stufensprung im Öffnen des Ventils ein. Diese Reaktion des offenen Regelkreises wird in vorbestimmten Zeitintervallen wiederholt, solange wie der Verdichterarbeitspunkt jenseits der Gefahrenschwelle bleibt.

Ein Öffnen des Pumpschutzventiles weiter als es notwendig ist, eine gegebene Störung daran zu hindern, ein Pumpen zu verursachen, wird den Prozeß, welcher das verdichtete Gas verwendet, unterbrechen. Folglich ist die Größe der Reaktion des offenen Regelkreises ein Kompromiß zwischen dem Schützen

des Verdichters vor großen Störungen und dem Minimieren der resultierenden Prozeßunterbrechungen.

Eine dritte Aufgabe dieser Erfindung liegt in der Optimierung dieses inhärenten Kompromisses zwischen dem Pumpschutz und der Prozeßunterbrechung.

Zum Lösen dieser Aufgabe kann die Erfindung die Größe einer jeden Stufenreaktion des offenen Regelkreises an die augenblickliche Geschwindigkeit anpassen, mit der sich der Arbeitspunkt der Pumpgrenze nähert, wie dies durch die Änderungsgeschwindigkeit des zuvor beschriebenen multivariablen Parameters definiert ist.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Reaktion der offenen Schleife das Pumpschutzventil nur so weit wie erforderlich öffnet, um jegliche vorgegebene Störung daran zu hindern, Pumpen hervorzurufen, wodurch die sich ergebende Prozeßunterbrechung minimiert wird.

Andere Ziele, Vorteile und neuen Merkmale der Erfindung werden durch die nachfolgende ausführliche Beschreibung der Erfindung sichtbar werden, wenn sie in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen betrachtet wird.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist ein schematisches Diagramm eines dynamischen Verdichters und einer Pumpschutzvorrichtung; und

Fig. 2 ist ein Verdichterkennfeld, welches die Arbeitsweise der Pumpschutzvorrichtung veranschaulicht.

Bestes Verfahren zur Verwirklichung der Erfindung

Es ist bekannt, daß eine dynamische Verdichtung durch Erhöhen der spezifischen mechanischen Energie (polytropic head) eines Gasstromes erzielt wird. Diese polytrope Verdichtungsarbeit (H_p) kann berechnet werden als:

$$H_p = B \times \frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma} \times \frac{T_s Z_{av}}{MW}$$

worin

- B eine Proportionalitätskonstante ist,
- R_c das Verdichtungsverhältnis ist,
- σ der Polytropenexponent ist,
- T_s die Ansaugtemperatur ist,
- MW das Molekulargewicht ist, und
- Z_{av} der durchschnittliche Kompressibilitätskoeffizient ist.

Es ist ebenso bekannt, daß diese Erhöhung der polytropischen Verdichtungsarbeit eine Funktion alleine des Ansaugvolumenstromes (Q_s) ist, welcher berechnet werden kann als:

$$Q_s = A \sqrt{\frac{\Delta P_0}{P_s} \times \frac{T_s \times Z_s}{MW}}$$

worin:

- A ein konstanter Koeffizient ist,
 ΔP_0 das Druckgefälle über der Durchflußmeßvorrichtung ist,
 P_s der Ansaugdruck ist, und
 Z_s der Kompressibilitätskoeffizient unter Ansaugbedingungen ist.

Das Verhältnis von H_p zu Q_2^2 kann so ohne Messung des Molekulargewichtes berechnet werden. Wenn wir voraussetzen, daß Kompressibilitätseffekte vernachlässigbar sind, können wir zeigen, daß:

$$\frac{H_p}{Q_2^2} \propto \frac{\frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma} \times \frac{T_s \times Z_{av}}{MW}}{\frac{\Delta P_0}{P_s} \times \frac{T_s \times Z_s}{MW}} = \frac{h_{red}}{q_{red}^2}$$

worin die normierte polytrope Verdichtungsarbeit (h_{red}) und normierter Ansaugvolumenstrom zum Quadrat (q_{red}^2) definiert sind als:

$$h_{red} = \frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma}$$

$$q_{red}^2 = \frac{\Delta P_0}{P_s}$$

Bis auf den Polytropenexponent (σ) sind alle diese Prozeßvariablen einfach zu messen. Diese Variable kann jedoch indirekt durch die Verwendung der

folgenden bekannten Beziehung zwischen der Temperatur und dem Verdichtungsverhältnis für polytrope Prozesse ermittelt werden:

$$R_\theta = R_c^\sigma$$

worin:

R_θ das Temperaturverhältnis über dem Verdichter ist.

Beachte, daß wenn das Verdichterkennfeld in den Koordinaten normierte Verdichtungsarbeit (h_{red}) gegen reduzierten Ansaugvolumenstroms im Quadrat (q_{red}^2) aufgetragen wird, das Verhältnis dieser Variablen die Steigung einer Linie vom Ursprung durch den Betriebspunkt definiert.

Durch Normieren dieser Steigung bezüglich ihres Wertes an der Pumpgrenze, die experimentell als eine Funktion von Rotationsgeschwindigkeit und Leitschaufelstellung bestimmt werden kann, erreichen wir einen geeigneten, selbst ausgleichenden, mehrfach veränderlichen Kennwert (S_{rel}) zur Messung der Lage des Verdichterbetriebspunktes.

$$S_{rel} = f(N, \alpha) \times \frac{h_{red}}{q_{red}^2}$$

Wenn sich der Betriebspunkt der Pumpgrenze nähert, wird der Wert dieses Kennwertes gleichförmig unter allen Eingangs- und Betriebsbedingungen auf Eins (1) ansteigen. Zusätzlich stellt die zeitliche Ableitung (dS/dt) dieses Kennwertes eine geeignete Messung der Geschwindigkeit bereit, mit dem sich der Betriebspunkt der Pumpgrenze nähert. Sowohl der gewünschte

Sicherheitsabstand als auch die Größe der Reaktion des offenen Regelkreises können dann als Funktionen dieser Ableitung berechnet werden.

Fig. 1 zeigt einen dynamischen Verdichter 101, der Gas von der Quelle 102 zu einem Endverbraucher 106 fördert. Das Gas tritt durch die Zuleitung 103, in welcher eine Stauscheibe 104 angeordnet ist, in den Verdichter ein und verläßt diesen über die Ausströmleitung 105. Überschußströmung wird über das Pumpschutzventil 107 zu der Quelle 102 zurückgeführt.

Fig. 1 zeigt auch die Pumpschutz-Regelvorrichtung und ihre Verknüpfungen mit dem Verdichterprozeß. Diese Regelvorrichtung enthält den Drehgeschwindigkeits-Meßwertgeber 108, den Leitschaukelstellungs-Meßwertgeber 109, den Eingangsdruck-Meßwertgeber 110, den Ausgangsdruck-Meßwertgeber 111, den Eingangstemperatur-Meßwertgeber 112, den Ausgangstemperatur-Meßwertgeber 113, den Durchfluß-Meßwertgeber 114 (welcher den Differenzdruck über der Strömungsmeßvorrichtung 104 mißt) und die Pumpschutzventil-Lagemeßeinrichtung 115.

Die Regelevorrichtung enthält auch Berechnungs- und Regelmodule 116 bis 135, welche in den folgenden Absätzen beschrieben werden.

Berechnungsmodul 116 berechnet das Temperaturverhältnis (R_θ) des dynamischen Verdichters 101 als das Verhältnis von Ausgangstemperatur (T_d) zur Ansaugtemperatur (T_s):

$$R_\theta = \frac{T_d}{T_s}$$

Entsprechend berechnet das Berechnungsmodul 117 das Verdichtungsverhältnis (R_c) als das Verhältnis von Ausgangsdruck (P_d) zu Ansaugdruck (P_s):

$$R_c = \frac{P_d}{P_s}$$

Das Modul 118 berechnet dann den Polytropenexponenten (σ) unter Verwendung der folgenden Form von Gleichung 6:

$$\sigma = \frac{\log R_\theta}{\log R_c}$$

Aufgrund der relativ langsamen Dynamik von Temperaturmeßvorrichtungen können Änderungen in dem gemessenen Wert des Temperaturverhältnisses (R_θ) hinter dem für das Druckverhältnis (R_c) zurückbleiben und so falsche Ausgleichvorgänge in dem berechneten Wert des Polytropenexponenten (σ) erzeugen. Diesem Effekt wird durch Einfügen eines Phasenverschiebungsregelmoduls 119 entgegengewirkt, das den berechneten Wert von σ filtert, um die Effekte der langsamen Temperaturmessungsdynamik zu minimieren.

Das Modul 120 berechnet dann die normierte polytrope Verdichtungsarbeit h_{red} des dynamischen Verdichters 101 als eine Funktion des Verdichtungsverhältnisses (R_c) und des Polytropenexponenten (σ), wie es durch die Gleichung 4 definiert ist; das Modul 121 berechnet den normierten Ansaugvolumenstrom zum Quadrat (q_{red}^2) als eine Funktion alleine des Differenzdruckes (ΔP_0) und des Einlaßdruckes (P_s), wie es in Gleichung 5 definiert ist; und das Modul 122 berechnet das Verhältnis dieser zwei

Variablen, welches die absolute Steigung (S_{abs}) einer Linie vom Ursprung zu dem Betriebspunkt ist, wenn sie in den Koordinaten h_{red} gegen q_{red}^2 aufgetragen wird:

$$S_{abs} = \frac{h_{red}}{q_{red}^2}$$

Der Wert dieser Steigung an der Pumpgrenze (S_{sl}) kann in die Regeleinrichtung als eine experimentell bestimmte Funktion der Drehgeschwindigkeit (N) und der Leitschaufelstellung (α) einprogrammiert werden. Das Modul 123 führt dann den Wert dieser Funktion unter die gemessenen Betriebszustände zurück:

$$S_{sl} = f(N, \alpha)$$

Das Modul 124 berechnet dann die relative Steigung der Linie vom Ursprung zum Betriebspunkt durch Normieren der absoluten Steigung (S_{abs}) bezüglich der Steigung der Pumpgrenze (S_{sl}):

$$S_{rel} = \frac{S_{abs}}{S_{sl}} = \frac{h_{red}}{q_{red}^2 \times f(N, \alpha)}$$

Die Module 125 bis 127 berechnen drei Variablen, die sowohl von den Modulen des geschlossenen als auch des offenen Regelkreises verwendet werden:

Das Modul 125 berechnet den relativen Abstand (d_{rel}) zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze:

$$d_{rel} = 1 - S_{rel}$$

Diese Variable ist für jede Veränderung des Verdichterwirkungsgrades, der Drehgeschwindigkeit, der Eingangsbedingungen oder der Gaszusammensetzung selbst ausgleichend;

das Modul 128 berechnet den Wert (v_{rel}), mit dem sich der Betriebspunkt in Richtung auf die Pumpgrenze bewegt durch Nehmen der zeitlichen Ableitung der relativen Steigung (S_{rel}):

$$v_{rel} = \frac{dS_{rel}}{dt}$$

Ein Anstieg in dem Wert dieser Ableitung wird anzeigen, daß der Betriebspunkt des Verdichters in Richtung auf die Pumpgrenze beschleunigt; und

das Modul 127 berechnet einen zusätzlichen Sicherheitsabstand (b_3), welcher proportional zu der Pumpanzahl ist, die durch Überwachung des Verdichterausgangsdruckes und der Zuführwertsignale für die plötzlichen Wechsel, welche einen Pumpzyklus charakterisieren, ermittelt werden.

Die Module 128 bis 131 führen die Reaktion des geschlossenen Regelkreises der Regeleinrichtung durch. Modul 128 berechnet die

Adaptivsteuerungsvorspannung (b_2) durch Verwendung eines von zwei Algorithmen:

wenn sich der Verdichterbetriebspunkt auf die Pumpgrenze zubewegt (v_{rel} größer als Null), wird b_2 als der größere Ihres vorhergehenden Wertes oder eines zweiten Wertes proportional zu v_{rel} berechnet. Auf diese Weise wird b_2 konstant gehalten, sofern sich der Betriebspunkt nicht in Richtung auf die Pumpgrenze beschleunigt;

wenn sich der Verdichterbetriebspunkt von der Pumpgrenze wegbewegt (v_{rel} kleiner als Null), wird b_2 langsam auf Null reduziert.

Das Modul 129 berechnet dann den vollständigen Sicherheitsabstand (b) durch Summieren der stationären Vorspannung (b_1), Adaptivsteuerungsvorspannung (b_2) und Pumpzählvorspannung (b_3), und der Komparator 130 berechnet die Abweichung (e) zwischen dem resultierenden Sicherheitsabstand (b) und dem relativen Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze:

$$e = d_{rel} - b$$

Dieses Regelabweichungssignal wird dann zu dem Proportional-Integral-Regler (131) geleitet, welcher das Antipumpventil (107) zu öffnen beginnt, wenn der Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze und den Sicherheitsabstand (b) schrumpft.

Die Module 132 bis 134 führen die Reaktion des offenen Regelkreises der Regeleinrichtung durch, welche ausgelöst wird, wenn der Abstand d_{rel} zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze kleiner ist als ein minimaler Schwellwert (d_s). Das Summierungsmodul 132 berechnet den Wert von d_s durch Addieren des Ausgangs (d_3) des Pumpzählers (Modul 127) auf den vom Bediener gelieferten Sollwert (d_1). Das Modul 133 erzeugt dann eine binäre

Ausgangsgröße, die anzeigt, ob d_{rel} kleiner ist als d_t oder nicht, und die zur Auswahl des Algorithmus verwendet wird, mit dem Modul 134 den Wert der Reaktion des offenen Regelkreises berechnet:

wenn d_{rel} unter d_t fällt, erhöht Modul 134 direkt seine Ausgangsgröße um einen zu v_{rel} proportionalen Betrag. Zusätzliche Erhöhungen werden in regelmäßigen Abständen (t_s Sekunden) addiert, solange wie d_{rel} kleiner als d_t ist und v_{rel} positiv ist -- wenn v_{rel} negativ ist, wird die Ausgangsgröße des offenen Regelkreises konstant gehalten;

wenn d_{rel} größer als d_t ist, verringert Modul 134 langsam den Wert der Reaktion des offenen Regelkreises unter Verwendung eines exponentiell abklingenden Algorithmus.

Schließlich berechnet Summierer 135 die benötigte Stellung des Pumpschutzventils durch Addieren der Reaktion des offenen Regelkreises vom Modul 134 auf die Reaktion des geschlossenen Regelkreises vom Modul 131. Dieses Signal wird dann zum Meßgrößenumformer 115 geschickt, welcher das Pumpschutzventil 107 entsprechend in Stellung bringt.

Die Wirkungsweise der in Fig. 1 dargestellten Regelvorrichtung kann an dem folgenden Beispiel erläutert werden (siehe Fig. 2).

Es wird angenommen, daß der in Fig. 1 gezeigte dynamische Verdichter anfänglich an Punkt A arbeitet, welcher am Schnittpunkt von Ladungskurve I und der Leistungskurve RPM_1 liegt. Der Wert von S_{rel} an diesem Punkt ist gleich der Steigung der Linie OA geteilt durch die Steigung der Linie OG.

Wenn der Verdichter stationär arbeitet und kein Pumpen erfaßt wurde seitdem der Pumpzähler zum letzten Mal zurückgesetzt wurde, wird der Sollwert für die Reaktion des geschlossenen Regelkreises der Regeleinrichtung mit Punkt D

übereinstimmen, wo die Steigung der Linie OD geteilt durch die Steigung der Linie OG gleich $1 - d_1$ ist. Entsprechend wird der Sollwert des offenen Regelkreises am Punkt E sein, wo das Gefälle der Linie OE geteilt durch das Gefälle der Linie OG gleich $1 - d_1$ ist.

Nun wird angenommen, daß ein Ladungswechsel die Ladungskurve von Position I zur Position II verschiebt und ein Beschleunigen des Verdichterbetriebspunktes hin zur Pumpgrenze verursacht. Als Reaktion auf diese Beschleunigung vergrößert das Adaptivsteuerungsmodul 128 den Sicherheitsabstand (b) um einen Betrag b_2 und verschiebt so den Sollwert des geschlossenen Regelkreises nach C. Wenn sich der Betriebspunkt seiner neuen stationären Position bei B nähert, wird der Wert der Annäherung an das Pumpen (v_{rel}) verringert, so daß der Sicherheitsabstand auf sein normales Niveau b_1 zurückgeht und der Sollwert auf D zurückgeht. Das Pumpschutzventil (107) bleibt geschlossen, da der Betriebspunkt bei B stabilisiert wird, ohne sich ständig zur linken Seite weder des Sollwertes des geschlossenen Regelkreises noch des Sollwertes des offenen Regelkreises zu bewegen.

Nun wird angenommen, daß dieser Ladungswechsel statt dessen die Ladungskurve von Position I nach Position IV verschoben hat, was den Betriebspunkt immer noch veranlaßt, sich auf die Pumpgrenze hin zu beschleunigen. Als Reaktion auf diese Beschleunigung würde Modul 128 den Sollwert des geschlossenen Regelkreises immer noch auf einen Punkt wie beispielsweise C hinbewegen, aber in diesem Fall würde der neue stationäre Betriebspunkt wahrscheinlich auf der linken Seite von Punkt C liegen. Sobald der Betriebspunkt sich auf die linke Seite von C bewegt, beginnt der Proportional-Integral-Regler 131 das Pumpschutzventil zu öffnen, um den Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze zurück auf den Sicherheitsabstand (b) zu vergrößern. Als ein Ergebnis der Ventilöffnung wird sich die Gesamtladungskurve zurück nach der Position III bewegen, so daß der

Betriebspunkt wahrscheinlich stabilisiert wird, bevor er den Sollwert E des offenen Regelkreises erreicht.

Sobald sich die Geschwindigkeit der Pumpannäherung (v_{rel}) auf Null verringert, wird sich der Betriebspunkt zurück auf die rechte Seite bewegen und der Sollwert wird langsam auf seine stationäre Position D zurückkehren. Das Pumpschutzventil (107) wird an jeder Position stabilisieren, welche auch immer benötigt wird, um die Ladungskurve an oder auf der rechten Seite der Position III zu halten, um so den Betriebspunkt an oder auf der rechten Seite von Punkt D zu stabilisieren, wo der Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze mindestens so groß ist wie der stationäre Sicherheitsabstand (b_1).

Schließlich wird angenommen, daß eine noch größere Störung plötzlich die Ladungskurve von Position I nach Position V verschiebt. In diesem Fall wird es die Reaktion des geschlossenen Regelkreises vermutlich nicht schaffen, den Betriebspunkt an der Bewegung auf die linke Seite des Sollwertes des offenen Regelkreises bei E zu hindern. Sobald der Betriebspunkt sich auf die linke Seite von E bewegt, wird das Regelmodul (134) des offenen Regelkreises die Öffnung des Pumpschutzventils um einen Betrag vergrößern, der proportional zu dem Betrag (v_{rel}) ist, mit dem sich der Betriebspunkt der Pumpgrenze nähert.

Es wird angenommen, daß der Betriebspunkt seine Bewegung in Richtung auf die Pumpgrenze für weitere t_c Sekunden fortsetzt, zu welcher Zeit er Punkt F passiert. Das Modul 134 wird dann die Öffnung des Pumpschutzventils um eine zweite Erhöhung C_2 vergrößern, welche proportional zu der Ableitung von S_{rel} an diesem Punkt sein wird. Aufgrund der schon eingeleiteten Regelvorgänge wird dann v_{rel} wahrscheinlich am Punkt F kleiner sein als es am Punkt E war. Somit sollte die zweite Zunahme (C_2) kleiner sein die erste (C_1).

Wenn das Pumptschutzventil weit genug geöffnet wurde, um die Geschwindigkeit der Pumpannäherung auf Null zu verringern, wird das Modul 134 aufhören, adaptive Erhöhung auf die Ventilöffnung zu addieren. Obwohl die Akkumulierte Reaktion des offenen Regelkreises dann langsam auf Null abklingt, wird das Proportional-Integral-Modul (131) fortfahren, die Ventilöffnung zu vergrößern, bis die Ladungskurve auf Position IV zurückgekehrt ist. Dieses führt den Betriebspunkt auf die Position D zurück, wo der Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze noch einmal gleich der stationären Stufe b_1 des Sicherheitsabstandes (b) ist.

Wenn sich die Drehgeschwindigkeit des Verdichters von RPM_1 auf RPM_2 verringert, berechnet das Modul 123 automatisch die Steigung der Linie durch den Pumpgrenzwertpunkt neu, so daß der Abstand (d_{rel}) zwischen dem Betriebspunkt und der Pumpgrenze relativ zu der Steigung der Linie durch den neuen Pumpgrenzwertpunkt H berechnet werden kann. Das Modul 123 wird ebenfalls automatisch Veränderungen in der Stellung jeder Leitschaufel ausgleichen. Da jede Bewegung des Betriebspunktes aufgrund von wechselnder Gaszusammensetzung oder wechselndem Polytropenwirkungsgrad in dem berechneten Wert von S_{rel} widergespiegelt wird, wird dieses Verfahren für alle diese Veränderungen selbst ausgleichend sein.

Die besondere, oben ausführlich beschriebene Kombination von geschlossenem und offenem Regelkreis paßt beide Reaktionen an die Größe von jeder einzelnen Störung an, durch Anwenden von von der Ableitung der Regelgröße abhängigen Regelreaktionen in einer Weise, die keine unnötigen Ventilbewegungen erzeugt und den Stabilitätsbedingungen genügt, ohne größere Sicherheitsabstände zu benötigen.

Folglich wird es klar erkannt werden, daß das hier offenbarte bevorzugte Ausführungsbeispiel die oben erwähnte Aufgabe tatsächlich erfüllt. Es ist offensichtlich, daß viele Modifikationen und Variationen der vorliegenden

Erfindung im Lichte der oben erläuterten Lehre möglich sind. Es versteht sich deshalb, daß innerhalb des Schutzbereiches der angehängten Ansprüche die Erfindung auf andere Weise realisiert werden kann als speziell beschrieben.

Ansprüche

1. Verfahren zum Pumpschutz für einen dynamischen Verdichter (101) mit Zuström- und Ausströmleitungsnetzen (103, 105), einem Pumpschutz-Ventil (107) zum Verbinden der Zuström- und Ausströmleitungsnetze (105, 103), und einem Pumpschutz-Regelsystem (108 bis 135), zur Betätigung des Pumpschutz-Ventils (107), um die Gasfließgeschwindigkeit durch den Verdichter (101) über einer Pumpgrenze zu halten, unter der der Verdichter pumpen würde, wobei die Pumpgrenze eine Funktion von verschiedenen Prozeßvariablen ist und wobei das Verfahren umfaßt:

eine kontinuierliche Berechnung sowohl einer geregelten Variablen und der Pumpgrenze als Funktion von einer oder mehreren Prozeßvariablen und Addition einer gesteuerten Reaktion zu dem Ausgang des Pumpschutz-Regelsystems immer dann, wenn die geregelte Variable unter der Pumpgrenze liegt;

Halten der gesteuerten Reaktion auf Null unter stationären Bedingungen, Erhöhung der gesteuerten Reaktion, um einen Betrag proportional zu der momentanen Geschwindigkeit, mit der sich die geregelte Variable der Pumpgrenze annähert, immer dann, wenn das Differential zwischen der geregelten Variablen und der Pumpgrenze unter einen Schwellwertpegel abfällt und zuvor eingestellten konstanten Zeitintervallen danach solange wie die geregelte Variable fortfährt, sich der Pumpgrenze zu nähern oder diese überschreitet und Verminderung der gesteuerten Reaktion langsam gegen Null immer dann, wenn das Differential

zwischen der geregelten Variablen und der Pumpgrenze anwächst.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner gekennzeichnet durch: eine kontinuierliche Berechnung des Differentials zwischen der geregelten Variablen und der Pumpgrenze und Addition einer gesteuerten Reaktion zu dem Ausgang des Pumpschutzreglers, um das Differential gleich einer Voreingestellten Sicherheitsgrenze zu halten, Beibehaltung der geregelten Reaktion auf einem konstanten Pegel immer dann, wenn das Differential Null ist, Erhöhung der geregelten Reaktion immer dann, wenn das Differential kleiner als Null ist und Verminderung der geregelten Reaktion immer dann, wenn sowohl das Differential als auch die geregelte Reaktion größer als Null sind.

3. Verfahren zum Pumpschutz für einen dynamischen Verdichter (101) mit einem entsprechenden Verdichterkennfeld und Zuström- und Ausströmleitungsnetzen (103, 105), einem Pumpschutz-Ventil (107) zum Verbinden der Zuström- und Ausströmleitungsnetze (105, 103), und einem Pumpschutz-Regelsystem (108 bis 135), zur Betätigung des Pumpschutz-Ventils (107), um den relativen Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze unter einem Wert zu halten, bei dem der Verdichter (101) pumpen würde, wobei der relative Abstand eine Differenz zwischen der relativen Kennlinienneigung des Verdichters und der relativen Kennlinienneigung der Pumpgrenze ist, wobei beide relativen Kennlinienneigungen Verhältnisse der tatsächlichen Kennlinienneigungen zu der Kennlinienneigung der Pumpgrenzlinie sind, beide tatsächlichen Kennlinienneigungen Tangenten der Winkel zwischen dem Arbeitspunkt und der horizontalen Achse des Verdichter-Leistungskennfelds und der Pumpgrenze und der

horizontalen Achse des Verdichter-Leistungskennfeldes ist, wobei das Verfahren umfaßt:

eine kontinuierliche Berechnung des relativen Abstandes zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze als eine Funktion von einer oder mehreren gemessenen Prozeßvariablen und Einstellung der Position des Pumpschutz-Ventils durch eine geschlossene Regelschleifenreaktion des Regelsystems, um den relativen Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze daran zu hindern, unter eine minimale Sicherheitsgrenze zu fallen, wobei die minimale Sicherheitsgrenze sowohl konstante als auch variable Teile umfaßt und durch Addition einer offenen Schleifenreaktion zu dem Ausgang des Pumpschutz-Regelsystems immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze unter einem voreingestellten Gefahrenschwellwert liegt, da, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze unterhalb des voreingestellten Gefahrenschwellwert liegt, der Arbeitspunkt die Pumpgrenzlinie überschreiten kann; und;

Halten der gesteuerten Reaktion auf Null unter stationären Bedingungen, Erhöhung der offenen Regelkreisreaktion, um einen Betrag proportional zu der momentanen Geschwindigkeit, mit der sich die gesteuerte Variable der Pumpgrenze nähert, immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze unter den voreingestellten Gefahrenschwellwert absinkt und zuvor eingestellten Zeitintervallen danach solange wie der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze fortfährt unter dem voreingestellten

Gefahrenschwellwert zu liegen und Verminderung der offenen Regelkreisreaktion langsam gegen Null immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Pumpgrenze höher als der voreingestellte Gefahrenschwellwert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, ferner gekennzeichnet durch:
 - kontinuierliche Manipulation der Position des Pumpschutzventils (107), um den Ausgang des Pumpschutz-Regelsystems (108-135) so einzustellen, daß der relative Abstand zwischen dem Arbeitspunkt des Verdichters (101) und der Pumpgrenze oberhalb der minimalen Sicherheitsgrenze liegt, wobei die Sicherheitsgrenze sowohl konstante als auch variable Teile umfaßt, Beibehaltung des variablen Teils auf Null unter stationären Bedingungen, Erhöhung des variablen Teils, wenn der Arbeitspunkt sich der Pumpgrenze mit einer wachsenden Geschwindigkeit nähert und langsamer Verminderung des variablen Teils, wenn sich die Annäherungsgeschwindigkeit an die Pumpgrenze vermindert;
 - Addition einer offenen Schleifenreaktion zu dem Ausgang des Pumpschutz-Regelsystems immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze hinter der Pumpgrenze liegt;
 - Beibehaltung der offenen Schleifenreaktion auf Null unter stationären Bedingungen, Erhöhung der offenen Schleifenreaktion um einen Betrag proportional zu der momentanen Geschwindigkeit mit der sich die geregelte Variable der geschlossenen Schleifenreaktion der Pumpgrenze der geschlossenen Schleifenreaktion annähert, immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze unter den voreingestellten Gefahrenschwellwert abnimmt und zuvor eingestellten Zeitintervallen danach solange wie der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze

fortfährt, unterhalb dem voreingestellten Gefahrenschwellwert zu liegen und Verminderung der offenen Schleifenreaktion langsam gegen Null immer dann, wenn der relative Abstand zwischen dem Verdichterarbeitspunkt und der Pumpgrenze höher als der voreingestellte Gefahrenschwellwert wird; und Erhöhung eines von (a) der Sicherheitsgrenze der geschlossenen Schleife und (b) dem Gefahrenschwellwert immer dann, wenn rasche Abfälle in einem von (a) der Fließgeschwindigkeit durch den Verdichter und (b) dem Abgabedruck des Verdichters festgestellt werden.

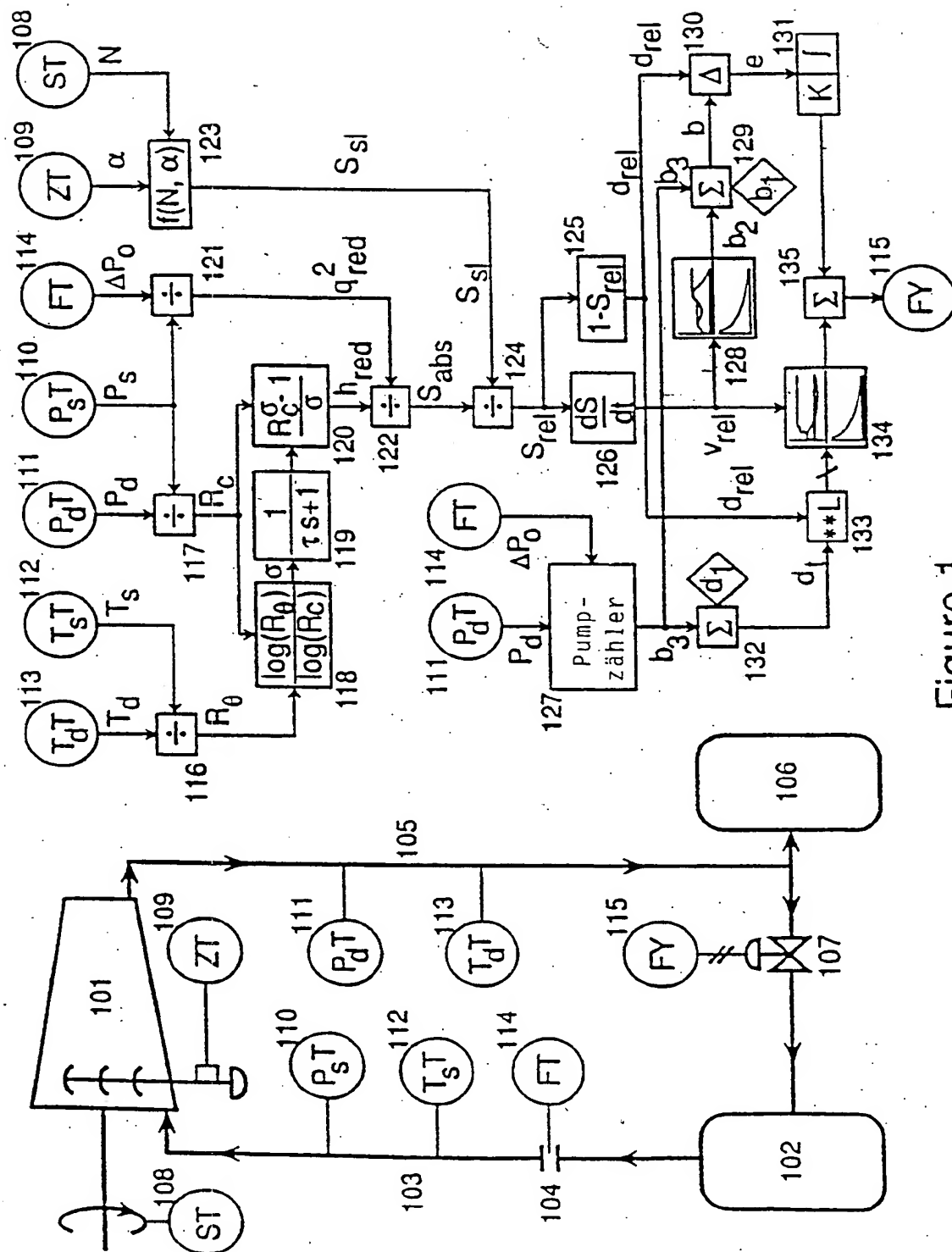


Figure 1

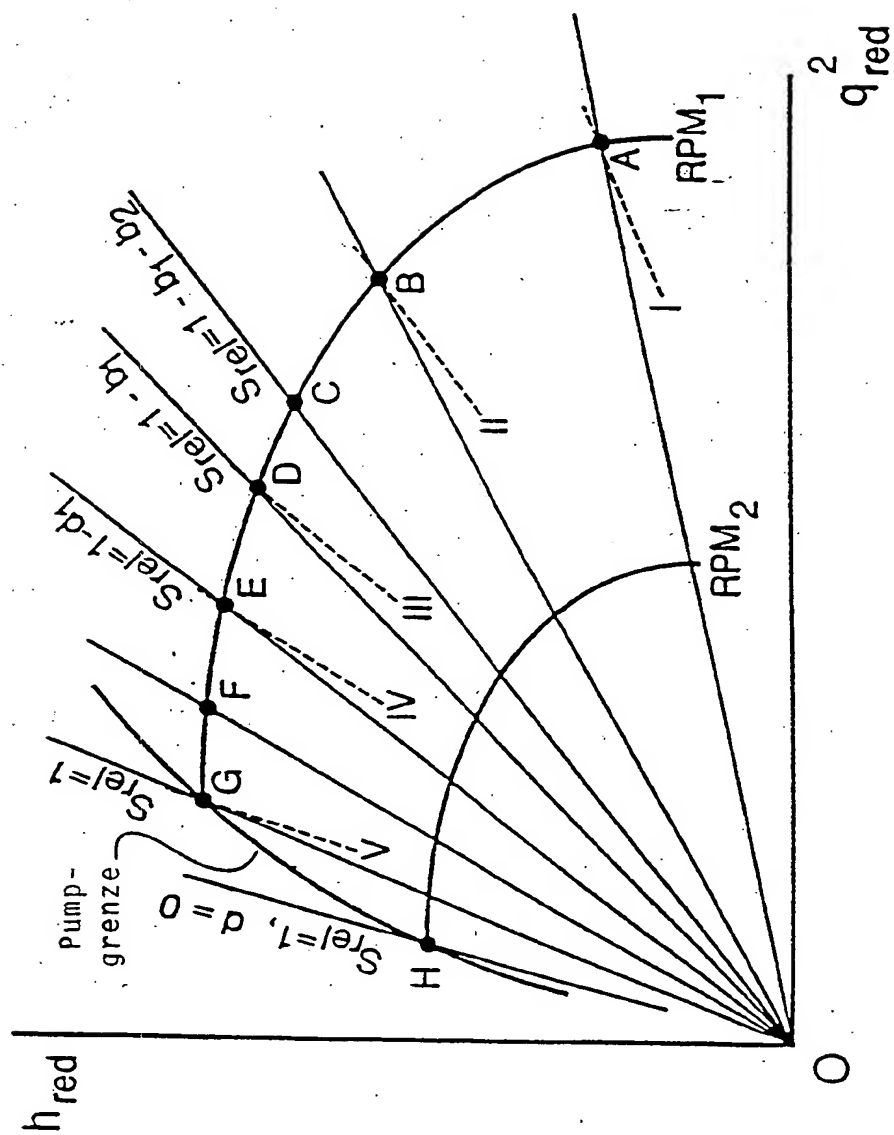


Figure 2